

Jätevedenpuhdistamon lietteen hyödyntämispotentialiaali

Suvi Lapinkangas

Kandidaatintutkielma

Kemian tutkinto-ohjelma

Oulun Yliopisto

2018

LYHENNELUETTELO

Lyhenne	Selite
RPBA	Kierrätettävä muovi tukiaineena (A recyclable plastic bulking agent)
LCFA	Pitkäketjuiset rasvahapot (Long chain fatty acid)
NMHC	Non-metaanihiilivedyt (Non-methane hydrocarbons)
CHP	Sähkön- ja lämmön yhteistuotanto (Combined heat and power)
SOFC	Kiinteä oksidi polttokenno (Solid oxide fuel cell)
MCFC	Sula karbonaatti polttokenno (Molten carbonate fuel cell)
PAH	Polyaromaattiset hiilivedyt (Polycyclic aromatic hydrocarbons)
PCDD/F	Polyklooratut dibentsodioksiinit ja furaanit (Polychlorinated dibenzodioxins and furans)
PCP	Pentakloorifenoli (pentachlorophenol)
PCB	Polyklooratut bifenyylit (Polychlorinated biphenyl)
DEPH	bis(2-etyyliheksyyli)ftalaatti (bis(2-ethylhexyl)phthalate)
LAS	Lineaarinen alkyylibentseenisulfonaatti (Linear alkylbenzene sulphonates)
NP/NPE	Nonyylifenolit ja nonyylifenolietoksylaatit (Nonylphenols and nonyphenol ethoxylates)
PFAS	Perfluoratut alkyyliyhdisteet (Perfluorinated alkylated substance)
PBDE	Polybromatut difenyylietterit (Polybrominated diphenyl ethers)
PBB	Polybromatut bifenyylit (Polybrominated biphenyl)
TBBA	Tetrabromibisfenoli-A (tetrabromobisphenol A)
AOX	Adsorboituva orgaaninen halogeeni (Adsorbable organic halides)

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	1
2	MITÄ PUHDISTAMOLIETE ON?	2
3	PUHDISTAMOLIETTEEN HYÖDYNTÄMINEN	2
	3.1 Aumakompostointi	2
	3.1.1 Kompostointiprosessin vaiheet	2
	3.1.2 Kompostoitumiseen vaikuttavat tekijät	4
	3.1.3 Kompostoinnin tukiaineet	6
	3.1.3.1 Turve	7
	3.1.3.2 Puuhake	7
	3.1.3.3 Muita tukiaineita	7
	3.1.4 Kompostoinnin lopputuotteen hyödyntäminen	8
	3.2 Mädätys	8
	3.2.1 Anaerobinen prosessi	8
	3.2.1.1 Prosessin toimintaedellytykset	10
	3.2.1.2 Biokaasuprosessit	12
	3.2.2 Biokaasun hyödyntäminen	13
	3.2.2.1 Liikennepolttoaine	13
	3.2.2.2 Sähkön- ja lämmöntuotanto	15
	3.2.3 Mädätysjäännöksen hyödyntäminen	17
	3.3 Hyödyntäminen kierrätyslannoitteena	17
	3.3.1 Lannoitteiden tyyppiryhmät	18
	3.3.2 Puhdistamolietteen ravinteet	18
	3.3.3 Puhdistamolietteen haitta-aineet	20
	3.3.3.1 Haitalliset metallit	20
	3.3.3.2 Taudinaiheuttajat	21
	3.3.3.3 Orgaaniset haitta-aineet	21
	3.3.4 PAKU-prosessi	24
	3.3.5 Paskier prosessi	24
	3.4 Muut hyödyntämismvaihtoehdot	25
4	YHTEENVETO	29
5	VIITTEET	30

1 JOHDANTO

Jätevesien puhdistustekniikan kehittymisen sekä teollistumisen myötä puhdistamolietteen määrä on kasvanut. Esimerkiksi Suomessa puhdistamolietettä syntyy vuosittain noin miljoona tonnia, joka vastaa kuiva-aineena noin 150 000 tonnia. Puhdistamoliete sisältää arvokkaita ravinteita, kuten fosforia, typpeä ja kaliumia. Kuitenkin sopimaton puhdistamolietteenkäsittely voi aiheuttaa vaaran ihmisen terveydelle sen sisältämien raskasmetallien, patogeenien ja orgaanisten haitta-aineiden takia. Puhdistamoliete täytyy siis hygienisoida ja stabiloida ennen sen hyödyntämistä maanparannusaineena tai lannoitteena.¹

Puhdistamolietettä voidaan käsitellä monella eri menetelmällä. Tässä työssä perehdytään yleisesti käytettyihin puhdistamolietteen käsittelymenetelmiin eli aumakompostointiin sekä mädätykseen. Lisäksi työssä käydään läpi puhdistamolietteen hyödyntämistä lannoitteena sekä sen sisältämiä epäpuhtauksia. Lopuksi käsitellään puhdistamolietteen muita kehitteillä olevia hyödyntämismenetelmiä.

2 MITÄ PUHDISTAMOLIETE ON?

Puhdistamoliete on jätevedenkäsittelyprosessin sivutuotetta, jätevesilietettä, jota muodostuu puhdistettaessa yhdyskuntien, kotitalouksien ja usein myös teollisuuden jätevesiä. Jätevedenpuhdistamolla syntyvä liete voidaan jakaa primääri- eli raakalietteeseen, sekundääri- eli ylijäämälietteeseen sekä tertiäärilietteeseen. Primääriliete on tiivistä ja sitkeää mekaanisen puhdistuksen, esiselkeytyksen, jälkeen poistettua kiintoainesta, kun taas sekundääriliete on hyvin vesipitoista ja juoksevaa biologisesta prosessista, esim. aktiivilieteprosessista, poistettua lietettä. Tertiäärinen liete on fosforipitoista kemiallisessa jälkisaostuksessa erotettua lietettä. Yleensä sekundääri- ja tertiääriliete johdetaan takaisin esiselkeytysaltaaseen, jolloin liete on erityyppisten komponenttien seos eli sekalietettä. Puhdistamolietettä voidaan käsitellä mm. mädättämällä tai kompostoimalla. Puhdistamolietteen käsittelyn tarkoituksena on pienentää lietteen tilavuutta, stabiloida ja hygienisoida liete sekä saattaa liete siihen muotoon, että sitä voidaan hyödyntää esimerkiksi lannoitteena tai maanparannusaineena.^{2,3}

3 PUHDISTAMOLIETTEEN HYÖDYNTÄMINEN

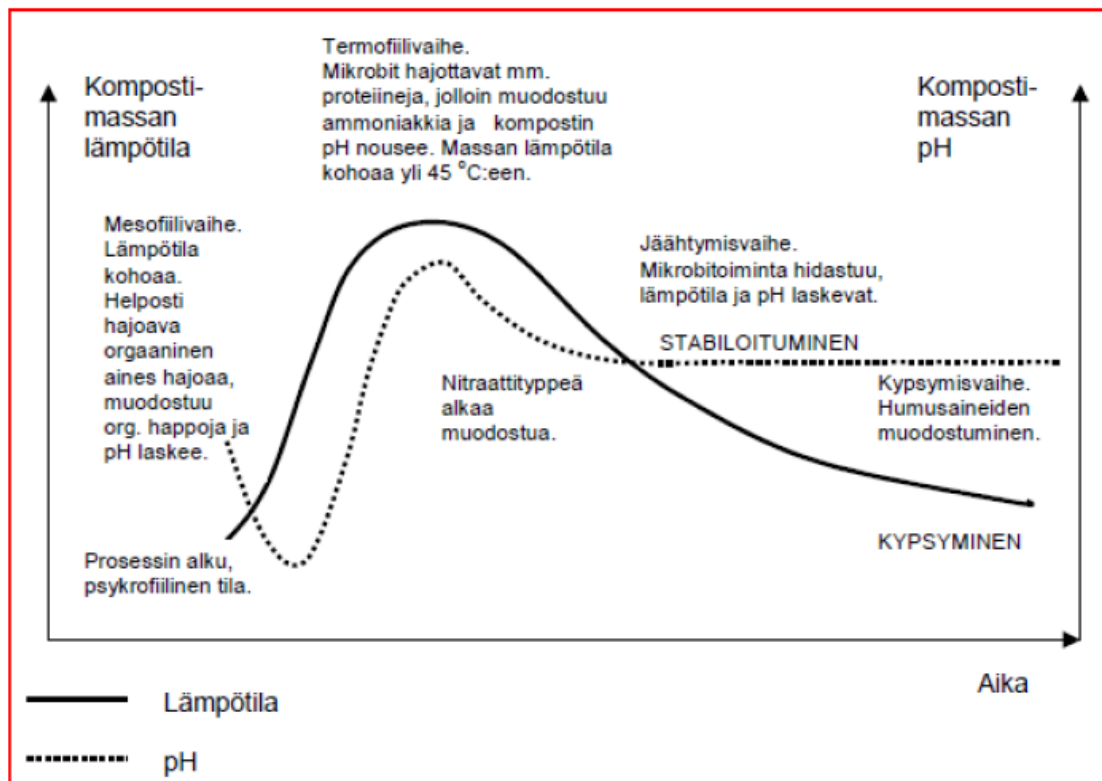
3.1 Aumakompostointi

Puhdistamoliete on epästabiilia, epämiellyttävän hajuista ja se sisältää useita haitallisia ja syövyttäviä kaasuja (NH_3 , H_2S). Kompostoimalla voidaan pienentää lietteen kokonaistilavuutta (noin 50 %), nopeuttaa orgaanisen aineksen hajoamista, stabiloida lietettä sekä laskea orgaanisten haitta-aineiden, patogeenien ja raskasmetallien pitoisuudet hyväksytylle tasolle. Aumakompostointi suoritetaan vettä läpäisemättömällä, pinnoitetulla alueella, johon lietettä kasataan noin kahden metrin korkuiseen, päästään kolmionmuotoiseen pitkään kasaan.^{3,4,5}

3.1.1 Kompostointiprosessin vaiheet

Kompostointi on aerobinen orgaanisen jätteen hallittu hajoaminen erilaisten mikrobipopulaatioiden vaikutuksesta. Sen tuloksena vapautuu vesihöyryä,

mikrobien tuottamaa lämpöenergiaa sekä vakaata, helposti käsiteltävää ja kypsää humusta. Lisäksi vapautuu hiilineutraalia hiilidioksidia, jolla ei ole nettovaikutusta ilmakehän hiilidioksidipitoisuuteen.^{2,3,5,6} Prosessi voidaan jakaa neljään eri vaiheeseen (kuva 1): mesofiilivaihe, termofiilivaihe, jäähtymisvaihe ja jälkikypsyminen.



Kuva 1. Lämpötilan ja happamuuden vaihtelu kompostointiprosessin vaiheiden aikana⁴

Alussa komposti on psykoofiilisessä tilassa eli sen lämpötila on matala (0-15°C). Ensimmäisessä vaiheessa, mesofiilivaiheessa, sädesienillä ja mesofiilisillä bakteereilla on runsaasti ravinteita käytettävissä, joten orgaanisen aineksen helposti hajoavat yhdisteet (sokeri, tärkkelys, rasvat) hajoavat todella nopeasti muodostaen orgaanisia happoja. Mesofiilivaiheessa voi myös muodostua kasveille myrkyllisiä, fytotoksisia yhdisteitä. Orgaanisen aineen hajoaminen on eksotermisen tapahtuma, joten kompostin lämpötila nousee yli 40 °C:een 24-48 tunnin aikana. Tällöin mikrobit kuluttavat happea ja tuottavat hiilidioksidia. Muodostuvien happojen johdosta komposti muuttuu happamaksi ja sen pH laskee alle seitsemän. Mesofiilivaihe kestää yleensä vain muutaman vuorokauden.^{7,8}

Toisessa vaiheessa eli termofiilivaiheessa kompostin lämpötila kasvaa, sillä aktiivisesti toimivat, termofiilisiin olosuhteisiin erikoistuneet bakteerit ja sädesienet tuottavat lämpöä hajottaessaan mm. proteiineja, tärkkelystä, selluloosaa ja hemiselluloosaa. Tällöin mikrobit käyttävät orgaaniseen aineeseen sitoutunutta tyyppiä energianlähteenään, jolloin vapautuu ammoniakkia ammonifikaatiolla, joka aiheuttaa kompostin pH:n nousun. Lämpötilan tulisi pysyä alle 65 °C, sillä hyödylliset mikrobit kuolevat liian korkeissa lämpötiloissa. Termofiilivaiheen lämpötilan ansiosta kasvispatogeenit, siemenet ja hyönteisen toukat kuolevat. Termofiilivaiheen kesto riippuu kompostin orgaanisen aineen määrästä, kosteudesta ja happipitoisuudesta. Yleensä se kestää muutamista vuorokausista viikkoihin, mutta joskus jopa kuukausia.^{7,8} Jotta kompostoinnin lopputuote olisi tarpeeksi hygieeninen, on tavoitteena, että termofiilinen vaihe kestäisi vähintään 14 vuorokautta.²

Ravinteiden määrä vähenee prosessin edetessä, joten mikrobien aktiivisuus vähenee ja komposti jäähtyy mesofiiliseen lämpötilaan.⁹ Stabiloitumiseksi kutsutaan vaihetta, jossa kompostin hajoaminen on tasaista. Tässä kolmannessa vaiheessa, jäähtymisvaiheessa, sienet ja aktinobakteerit alkavat hajottamaan vaikeasti hajoavia aineita, kuten ligniiniä. Lisäksi mesofiilivaiheessa muodostuneet fytotoksiset aineet tuhoutuvat. Kompostissa voidaan havaita tunkiolieroja, kovakuoriaisia ja tuhatjalkaisia. Jäähtymisvaihe kestää yleensä useita kuukausia ja tällöin alkaa kompostin humustuminen ja kompostin pH vakiintuu välille 7-8.⁸

Viimeisessä jälkikypsymisvaiheessa eliöt hajottavat vielä vaikeasti hajoavia yhdisteitä, mutta eivät kuluta happea. Tällöin kompostin lämpötila on sama kuin ympäristön lämpötila. Jälkikypsymisvaihe kestää useita kuukausia, jonka aikana humuksen muodostuminen on voimakasta. Näin ollen lopputuotteena saadaan käyttökelpoista stabiilia multaa.⁸

3.1.2 Kompostoitumiseen vaikuttavat tekijät

Mikrobit vaativat happea hajottaessaan aerobisesti orgaanista ainesta. Mikäli happea on liian vähän, voi olosuhteet muuttua anaerobisiksi, jolloin prosessi on hitaampi ja tuottaa kasvihuonekaasuja sekä epämiellyttäviä hajuja. Liian suuri happipitoisuus taas johtaa lisäkustannuksiin ja suurempiin lämpö-, vesihöyry- ja ammoniakkihäviöihin.⁷ Kompostin optimaalinen happipitoisuus on 5-20 %.

Kompostikasan ilmastus voidaan suorittaa kääntämällä, sekoittamalla, pakotetulla ilmastuksella tai luonnollisella konvektiolla.¹⁰ Pakotetussa ilmastuksessa aumaan pakotetaan ilmapvirtaus imemällä alipaineella ilmaa kompostista tai puhaltamalla ylipaineella ilmaa kompostiin. Kääntäminen jakaa happea tasaisesti koko kompostikasaan sekä tasaa kompostin olosuhde-eroja ja siten mahdollistaa orgaanisen aineen tasaisen ja nopeutuneen hajoamisen. Kääntämisellä varmistetaan, että koko auman massa on jossakin vaiheessa kuumassa keskustassa, jossa tapahtuu taudinaiheuttajien tuhoutuminen. Kääntämisen haittapuolena on orgaanisen aineen ja typen hävikit. Varsinkin jos kääntäminen suoritetaan useamman kerran tai termofiilisessä vaiheessa, on orgaanisen aineen ja typen hävikit suuria.^{4,8}

Mikrobien aineenvaihdunnalle on tärkeää, että auman kosteuspitoisuus on sopiva (40-65 %), sillä vesi kuljettaa liuenneita ravintoaineita mikro-organismeille.⁷ Mikäli kosteuspitoisuus on alle 40 %, hajottajien toiminta pysähtyy ja siten aerobinen prosessi estyy. Jos kosteuspitoisuus on yli 65 %, vesi syrjäyttää partikkelien ilmatilaa, joka johtaa anaerobisiin olosuhteisiin, hajoamisnopeuden hidastumiseen ja epämiellyttäviin hajuihin. Auman huokoisuutta ja ilmanläpäisevyyttä voidaan parantaa lisäämällä sekaan tukiaineita. Kompostointiprosessissa haihtuu vesihöyryä, jolloin auman kosteuspitoisuus pienenee.^{8,11}

Mikrobit käyttävät ravintoaineenaan ensisijaisesti hiiltä, typpeä, fosforia ja kaliumia. Hiili on mikrobien energianlähde, jota ne tarvitsevat elintoimintojensa ylläpitoon ja typpi toimii solujen rakennusaineena, jota ilman mikrobit eivät pysty hyödyntämään hiiltä.⁸ Kompostin toimivuuden kannalta on tärkeää, että hiili-typpeä suhde (C/N) on välillä 25:1-30:1. Sopiva C/N suhde varmistaa yleensä sen, että muita tarvittavia ravinteita on tarpeeksi saatavilla. Liian alhaisessa C/N suhteessa (<20:1) mikrobit kuluttavat hiiltä nopeasti, mikä johtaa ylimääräiseen ammoniakin ja typen oksidien tuotantoon ja epämiellyttäviin hajuihin. Jos C/N suhde on yli 40:1, typpeä ei riitä tarpeeksi mikrobien kasvuun, jolloin kompostointiprosessi hidastuu.¹¹

Lisäksi kompostin lämpötila on tärkeä tekijä onnistuneessa kompostoinnissa. Liian alhainen lämpötila laskee mikrobien aktiivisuutta mikä aiheuttaa orgaanisen aineen hajoamisnopeuden hidastumisen. Tämän vuoksi kompostoitumisprosessi on hitaampi talvella. Liian korkea lämpötila puolestaan voi johtaa hyödyllisten mikrobien tuhoutumiseen.⁶ Lisäksi kompostin partikkelikoko vaikuttaa

kompostointiin siten, että mitä pienempi partikkelikoko on, sitä voimakkaampaa on orgaanisen aineen hajoaminen. Liian pieni partikkelikoko voi toisaalta heikentää hapen diffuusiota kompostissa.¹¹

3.1.3 Kompostoinnin tukiaineet

Puhdistamolietteen kosteuspitoisuus on suuri, joten kompostoinnissa lietteen sekaan sekoitetaan kuivaa ainetta eli tukiaineita (seosaine). Kompostin kuiva-ainepitoisuuden tulisi olla noin 40 %.³ Tukiaineet peittävät hajuja sekä absorboivat kosteutta, ja siten parantavat ilmanläpäisevyyttä ja huokoisuutta luomalla kompostin partikkelien väliin tyhjiöitä. Tämä estää kompostin liiallisen tiivistymisen sekä parantaa kompostin laatua ja nopeuttaa kompostointiprosessia. Lisäksi tukiaineet vähentävät kompostoinnissa syntyviä ammoniakki-, rikkivety- ja kasvihuonekaasupäästöjä (CO_2 , CH_4 , N_2O) sekä tasapainottavat kompostin C/N suhdetta, sillä niiden hiilipitoisuus on yleensä korkea.⁹

Tukiaineina voidaan käyttää erilaisia puun- ja kasvijalostuksen jäännöksiä, kuten haketta, sahanpurua, puunkuorta ja olkia sekä puuvillajätettä. Liian suuri tukiainepitoisuus kuivattaa kompostia liikaa, jolloin kompostoitumisprosessi hidastuu. Vähäinen määrä tukiaineita aiheuttaa hajuongelmia sekä anaerobisia olosuhteita, sillä tällöin komposti on liian märkää ja tiivistä. Tukiaineita voidaan jakaa aktiivisiin ja inertteihin aineisiin sen mukaan onko tukiaine mukana biologisissa reaktioissa kompostiprosessissa. Inertit tukiaineet passisoivat paremmin raskasmetalleja, parantavat kompostin fyysistä rakennetta ja kosteuspitoisuutta, mutta eivät pysty muuttamaan kompostin C/N- suhdetta. Paras hyöty tukiaineista saadaankin siten, että sekoitetaan eri tukimateriaaleja keskenään.^{7,12}

Tukiaineen partikkelikoko vaikuttaa kompostin happipitoisuuteen. Jos partikkelikoko on pieni, termofiilinen lämpötila saavutetaan aikaisemmin ja se on pitkäkestoisempi, minkä ansiosta useimmat taudinaiheuttajat kuolevat. Toisaalta liian pieni partikkelikoko voi estää ilmavirran kompostiin.¹³

3.1.3.1 Turve

Turve on hyvin yleinen tukiaine puhdistamolietteen kompostoinnissa. Se on huokoinen ja sillä on suuri pinta-ala, joten se sitoo kompostointiprosessin kosteutta, hajuja, ammoniakkia sekä imee itseensä kompostista liukenevia aineita. Turve maatuu hyvin ja sisältää valmiiksi pieneliökunnan. Turpeen ongelmana on sen tiivistyvyys, joten sen sekaan hyvä sekoittaa jäykempiä tukiaineita, kuten haketta tai kuoriketta.¹⁴

3.1.3.2 Puuhake

Puuhakkeen rakenne on jäykkä, joten se ei painu turpeen tapaan kasaan kompostissa. Näin ollen ilmavirtaus kompostissa on hyvä. Lisäksi puuhakkeen etuna on se, että se ei jäädy talvella helposti. Se absorboi jonkin verran kosteutta sekä neutralisoi ammoniakkia. Puuhakkeen ongelmana on kuitenkin hajujen sitomattomuus sekä huono maatuvuus.¹⁴

3.1.3.3 Muita tukiaineita

Perinteiset tukiaineet hajoavat helposti, joten niitä ei voida käyttää uudelleen, mikä kasvattaa kustannuksia. Tämän vuoksi on tutkittu tukiaineita, jotka voidaan seuloa kompostista ja käyttää uudelleen. Esimerkiksi kierrätettävän muovin (a recyclable plastic bulking agent, RPBA) käyttökelpoisuutta tukiaineena on tutkittu. RPBA:n onkin havaittu parantavan kompostin happipitoisuutta ja siten mikrobien aineenvaihduntaa, vedenpoistoa sekä fytotoksisuutta. Sen ongelmana on kuitenkin termofiilivaiheen liian lyhyt kesto, jolloin kompostin tuote ei ole tarpeeksi hygienisoitua.¹³

Sakkaroosilla täytetyn hohkakiven käyttöä tukiaineena on tutkittu. Hohkakivi on kevyt, kierrätettävä, hyvin huokoinen vulkaaninen kivi, joka ei sisällä orgaanista materiaalia ja ei siten voi muuttaa C/N -suhdetta. Sakkaroosi toimii hiililähteenä. Hohkakiven huokoisen rakenteen vuoksi se imee kapilaarisen voiman avulla hyvin vettä. Lisäksi se edistää mikrobien kykyä käyttää ammoniakkia solujen

rakennusaineena eli ammoniakin assimilaatiota orgaaniseksi typeksi ja siten pienentää ammoniakin haihtumista ja typpihäviöitä.¹²

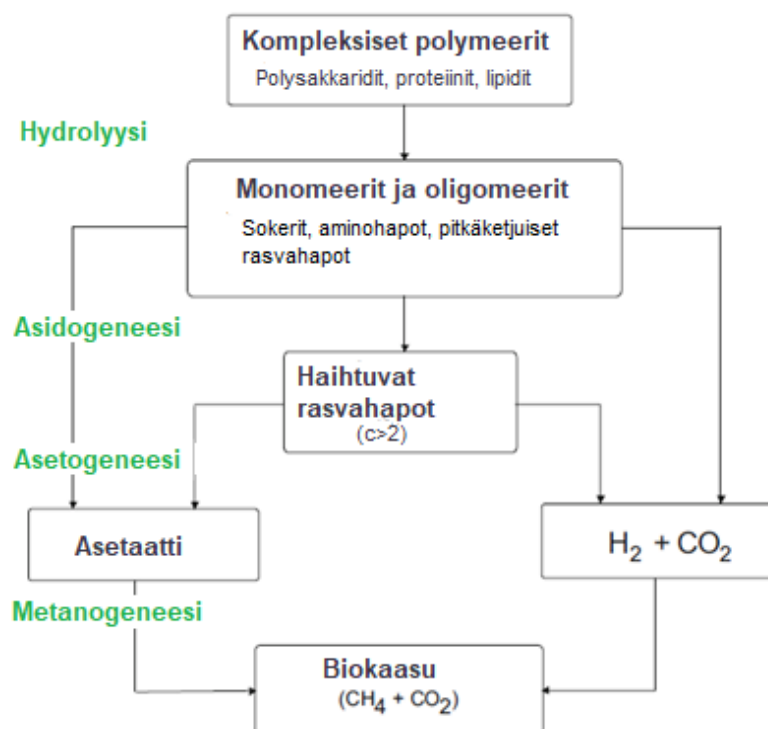
3.1.4 Kompostoinnin lopputuotteen hyödyntäminen

Kompostoitua lietettä voidaan käyttää maanparannusaineena viherrakentamisessa ja maisemoinnissa sekä lannoitteena peltoviljelyssä. Maanparannusaineet ylläpitävät maaperän fysikaalisia ominaisuuksia sekä lisäävät maan biologista toimintaa. Ne parantavat maaperän veden- ja ravinteidenpidätyskykyä ja kasvien juurien syvyyskasvua sekä helpottavat maaperän maanmuokkausta. Niitä voidaan käyttää mm. tieluiskien rakentamiseen, eroosion estoon, nurmien perustamiseen ja maisemointiin. Kompostoidun lietteen etuja ovat sen keveys, tasalaatuisuus sekä ilmavuus, hyvä vedensietokyky, ravinteiden pitkäaikainen vaikutus ja lisäksi se ei liety.¹⁴

3.2 Mädätys

3.2.1 Anaerobinen prosessi

Mädätys on nelivaiheinen, anaerobinen prosessi (kuva 2), jossa erilaiset mikrobipopulaatiot hajottavat orgaanisen jätteen. Se etenee ketjumaisesti, niin että ensimmäisen vaiheen tuotteet ovat seuraavien mikrobikantojen käytettävissä. Prosessi suoritetaan hapettomissa olosuhteissa ilmatiiviissä säiliöissä eli biokaasureaktoreissa. Mädätys vähentää ympäristön pilaantumista, sillä se estää metaanin pääsyn ilmakehään ja vapauttaa hiilineutraalia hiilidioksidia.^{2,15}



Kuva 2. Anaerobisen prosessin vaiheet¹⁶

Prosessin ensimmäinen vaihe on hydrolyysi, jossa lietteen suurimolekyylliset yhdisteet (proteiinit, lipidit ja hiilihydraatit) hajoavat entsyymien avustuksella ja liukenevat veteen muodostaen sokereita, aminohappoja ja pitkäketjuisia rasvahappoja (LCFA). Koska orgaaniset molekyylit ovat liian suuria saadakseen ravintonsa solun sisältä, tapahtuu hajoaminen solun tuottamien ja välittämien hydrolyyttisten entsyymien avulla solun ulkopuolella.^{17,18}

Hajoamisen toinen vaihe on asidogeneesi eli happokäyminen, jossa fermentoivien mikrobien toimesta ensimmäisen vaiheen tuotteet hajoavat yksinkertaisiksi orgaanisiksi hapoiksi, kuten etikka-, voi- ja maitohapoksi sekä alkoholeiksi. Samalla muodostuu hiilidioksidia, vetyä ja ammoniakkia. Liuoksessa orgaaniset hapot esiintyvät kuitenkin pääosin anioneina, kuten asetaattina. Happokäymisen tuotekoostumus vaihtelee riippuen syötteestä, olosuhteista ja mikrobikannasta.^{3,17,18}

Kolmas vaihe on asetogeneesi eli etikkahappokäyminen, jossa toisen vaiheen orgaanisista hapoista tuotetaan asetaattia, vetyä ja hiilidioksidia, jotka ovat metaanin tuotannon raaka-aineita. Kyseessä on anaerobinen hapettuminen, jossa

ei käytetä happea (O_2), vaan reaktioon osallistuu hapettuneita yhdisteitä, kuten sulfaatteja, nitraatteja ja karbonaatteja. Nämä yhdisteet toimivat elektronien vastaanottajina eli pelkistyvät reagoidessaan asetogeenien kanssa. Asetogeeniset bakteerit ja vetyä kuluttavat metanogeenit ovat symbioosissa keskenään, joten vetyä muodostuu ja kuluu tasapainoisesti. Näin ollen vetypitoisuus ei pääse liian korkeaksi, joka estäisi asetogeenien toiminnan.^{17,18}

Anaerobisen prosessin viimeinen vaihe on metanogeneesi, jossa vedystä, hiilidioksidista ja asetaatista muodostuu metaania ja hiilidioksidia eli biokaasua metanogeenibakteerien avustuksella. Näitä bakteereita on kahdenlaisia; asetotrofit käyttävät asetaattia ja hydrogenotrofit vetyä metaanin muodostuksessa. Asetotrofien on arvioitu muodostavan ainakin 70 % metaanista.^{17,18}

3.2.1.1 Prosessin toimintaedellytykset

Anaerobiseen reaktioon osallistuvat mikrobit ovat riippuvaisia ympäristöolosuhteista. Yksi merkittävämmistä tekijöistä on lämpötila, jolle on määritetty kaksi optimialuetta. Anaerobinen prosessi voi toimia joko mesofiilisesti tai termofiilisesti. Mesofiilisessä prosessissa lämpötila on 35-37 °C ja termofiilisessä 55-70 °C.^{17,19} Koska termofiilisessä mädätyksessä lämpötila on korkeampi, on bakteerien kasvutahti sekä orgaanisen aineen hajoamisnopeus suurempi, joten se on tehokkaampi kuin mesofiilinen mädätys ja siten mädätysjäännös on hygieenisempi ja saadun biokaasun määrä suurempi.^{15,16} Termofiilisen mädätyksen ongelmana on kuitenkin alhainen stabiilisuus, herkkyys ympäristönmuutoksille ja korkeat lämmityskustannukset. Suomessa suurin osa mädätyslaitoksista toimii mesofiilisesti. Koska mikrobit ovat herkkiä lämpötilavaihtelulle, on lämpötila pidettävä mahdollisimman tasaisena, johon voidaan vaikuttaa hyvällä sekoituksella.¹⁸ Liian matala lämpötila vähentää mikrobien kasvua ja biokaasun tuotantoa sekä johtaa solun energian vähenemiseen ja jopa solun täydelliseen hajoamiseen. Liian korkea lämpötila taas nostaa ammoniakkipitoisuutta, joka estää metanogeneesiä ja aiheuttaa siten biokaasun tuotannon vähenemistä.¹⁵

Ideaalinen pH-alue, jossa mikrobit pystyvät toimimaan jokaisessa anaerobisen prosessin vaiheessa, on 6,8-7,4. Kuitenkin asidogeneesin optimi pH-alue on 5,5-6,5 ja metanogeneesin 6,5-8,2, joten kaksivaiheinen anaerobinen hajoamisprosessi on

tehokas ratkaisu. Mikäli pH on liian alhainen, mikrobit eivät pysty muuttamaan syntyneitä happoja kaasuiksi.¹⁹ Hyvin toimivan prosessin pH pysyy vakiona, sillä prosessilla on hyvä puskurointikyky eli se pystyy neutraloimaan syntyviä orgaanisia happoja. Alkaliteetti kuvaa tätä kykyä siten, että mitä parempi puskurikyky on, sitä stabiilimpi on prosessi ja korkeampi alkaliteetti. Puskurointikyky johtuu pääasiassa bikarbonaatti-karbonaattipuskurisysteemistä (HCO_3^- / CO_3^{2-}). Bikarbonaattia muodostuu, kun syntyvä hiilidioksidi liukenee veteen muodostaen hiilihappoa, joka voi ionisoitua bikarbonaattimuotoon. Lämpötilan noustessa hiilidioksidin liukoisuus veteen pienenee, joten termofiilisen prosessin pH on korkeampi kuin mesofiilisen prosessin.^{15,18}

Hiilen ja typen suhteen optimiarvo on 25:1.¹⁸ Liian korkea C/N-arvo johtaa typen nopeaan hajoamiseen ja siten pieneen biokaasun tuotantoon. Liian pieni C/N-arvo taas johtaa suuriin ammoniakkipäästöihin.¹⁹

Biokaasun tuotannon kannalta viipymääjan eli syötteen reaktorissa viettämän ajan on oltava riittävä. Mesofiilisen prosessin viipymäaika on noin 21 vrk ja termofiilisen 14 vrk. Viipymäaikaan vaikuttavat syötteen kuiva-ainepitoisuus, orgaanisen aineen määrä, lämpötila sekä syötteen sekoittaminen ja reaktorin tilavuus. Yleisesti viipymäaika on riittävä, kun biokaasun tuotanto on tasaista ja orgaanisen aineen reduktio käsittelyjäännöksessä on 50-60 %. Mitä pidempi on viipymäaika, sitä suurempi on saadun biokaasun määrä ja sitä hygienisoidumpaa on mädätysjäännös. Toisaalta pitkän viipymääjan ongelmana on lämmitykseen ja sekoitukseen kuluva energian määrä, joka kasvattaa käyttökustannuksia.^{17,18}

Syötteen kuiva-ainepitoisuuden avulla voidaan arvioida syötteen orgaanisen aineen pitoisuus. Orgaanisen kuorman määrän on oltava 3-9 kgVS/m³d (kiloa orgaanista ainetta reaktorin nestetilavuutta sekä vuorokautta kohden laskettuna). Suuri orgaaninen kuorma voi kasvattaa hieman biokaasun tuotantoa, mutta saattaa myös häiritä prosessin tasapainoa ja tuottavuutta, sillä suuren kuorman johdosta mikrobien aktiivisuus voi väliaikaisesti estyä.¹⁹ Anaerobinen prosessi voi olla märkä- tai kuivamädätys. Märkämädätyksessä kuiva-ainepitoisuus on alle 16 % ja kuivamädätyksessä 22-40 %.¹⁵ Lisäksi kosteus vaikuttaa metaanintuotantoon, siten että paras metaanintuotanto saavutetaan suuressa kosteuspitoisuudessa (60-80 %).¹⁸

Vääränlaiset prosessiolosuhteet, kuten pH, lämpötila, C/N-suhde ja sekoituksen vähäisyys voivat häiritä ja heikentää prosessin toimintaa. Prosessiin kulkeutuu biokaasutuottoa inhiboivia aineita syötteen sekä sen hajoamisen seurauksena. Inhibitiota voivat aiheuttaa mm. ammoniakki, rikkivety, rasvahapot, metallit sekä hivenaineet. Ammoniakki on mikrobien tärkeä typpiravinne ja se esiintyy liuoksessa joko ammoniakkinä (NH_3) tai ammoniumionina (NH_4^+). Näistä ammoniakki on haitallisempi, sillä se kulkeutuu helpommin solun sisään. Liian suuri ammoniakkipitoisuus häiritsee mikrobikantaa ja voi pysäyttää jopa koko prosessin. Rikkivetyä (H_2S) muodostuu mm. proteiinien anaerobisessa hajoamisessa sekä sulfaattia pelkistävien bakteerien reaktiotuotteena. Se esiintyy liuoksessa tasapainossa vetysulfidi-ionin (HS^-) kanssa, joka voi muodostaa metallien kanssa saostumia eli voi sitoa hajotukselle välttämättömiä hivenaineita. Mikäli syöte on hyvin rasvaista, voivat muodostuneet pitkäketjuiset rasvahapot, etenkin propaani- ja voi happo, inhiboida sekä metaanin tuotantoa että hajoamisketjun aiempia vaiheita.¹⁶ Lisäksi korkea suola- ja metallipitoisuus sekä antibiootit ja desinfiointiaineet hidastavat mikrobitoimintaa.^{17,18}

3.2.1.2 Biokaasuprosessit

Biokaasuprosessit voidaan jakaa kuiva- ja märkäprosessiin, jatkuva- ja panostoitumiseen prosessiin sekä yksi- ja kaksivaihteiseen prosessiin. Jatkuvatuotumisessa prosessissa syötettä pumpataan reaktorin sisälle ja pois säännöllisesti jatkuvana virtana, jolloin biokaasun tuotanto on tasaista. Panostoitumisessa prosessissa kaikki liete johdetaan kerralla reaktoriin, ja poistetaan yhdellä kertaa sopivan viipymääjan kuluttua. Tällöin biokaasun tuotanto ja -laatu eivät ole niin tasaisia, sillä kaasuntuotannon käynnistyminen kestää useita päiviä uudessa panoksessa. Lisäksi biokaasureaktorin tyhjennyksen aikana biokaasun menetykset voivat olla suuria. Panostoitumisen prosessin etuna on kuitenkin sen edullisuus ja hyödyllisyys arvioitaessa anaerobisen prosessin nopeutta. Koska puhdistamolietteen kuiva-ainepitoisuus on noin 1 %, on lietteen kuiva-ainepitoisuutta nostettava ennen syöttöä biokaasureaktoriin.^{15,18}

Useimmat biokaasulaitokset koostuvat biokaasureaktorista ja jälkikaasualtaasta, jonne mädätysjännöksestä edelleen muodostuva biokaasu kerätään talteen.

Tällaisessa yksivaihteisessa prosessissa syötteen hajoaminen tapahtuu siis yhdessä reaktorissa, toisin kuin kaksivaihteisessa prosessissa. Siinä hydrolyysi- ja metaanintuottovaihe tapahtuvat erillisissä reaktoreissa. Tämä mahdollistaa sen, että hajotuksessa muodostuva vety voidaan ottaa talteen ensimmäisen vaiheen jälkeen, jolloin koko prosessiin tuotteena saadaan vedyllä rikastettua metaanikaasua, jonka energiasisältö on suurempi kuin tavallisen biokaasun. Lisäksi kaksivaiheisen prosessin vakautta voidaan säädellä paremmin, mikä estää ylikuormituksen ja myrkyllisten aineiden kertymisen. Kaksivaihteisen prosessin ongelmana on kuitenkin suuret kustannukset ja huoli sen toimivuudesta.^{15,17,18}

3.2.2 Biokaasun hyödyntäminen

Mädättämön toimiessa hyvin noin 40 % lietteen orgaanisesta aineesta muuttuu kaasuksi, 50 % jää lietteeseen ja 10 % lietevedeen. Biokaasu sisältää noin 60-70 % metaania ja 30-40% hiilidioksidia sekä pienen määrän vetysulfidia, ammoniakkia ja vesihöyryä. Energiankysynnän kasvaessa biokaasulla on tulevaisuudessa hyvin tärkeä rooli, sillä sitä voidaan käyttää fossiilisten polttoaineiden (öljy, hiili) korvaamiseen sekä lämmön- ja sähköntuotannossa että ajoneuvojen polttoaineena.¹⁶

3.2.2.1 Liikennepolttoaine

Biokaasua voidaan hyödyntää sekä puhdistettuna että puhdistettuna ja jalostettuna liikenne- ja työkonepolttoaineena. Biokaasun puhdistuksen tarkoituksena on epäpuhtauksien (vetysulfidi, happi, typpi, vesi, hiukkaset) poistaminen (taulukko 1). Jalostuksessa vähennetään inerttejä kaasuja, kuten hiilidioksidia ja typpikaasua, jotka eivät ole epäpuhtauksia, mutta jotka eivät sisällä energiaa. Hiilidioksidi on mahdollista poistaa mm. vesipesulla tai orgaanisten liuottimen avulla. Tällöin biokaasun metaanipitoisuuden tulee nousta vähintään 95 %. Puhdistetun biokaasun pienen energiatiheuden takia kaikki tehdasvalmisteiset metaaniajoneuvot on suunniteltu jalostettua biokaasua ja maakaasua varten.^{16,18,21}

Taulukko 1. Biokaasun epäpuhtaudet, niiden aiheuttamat ongelmat ja niiden puhdistusmenetelmät¹⁸

Epäpuhtaus	Laitehaittoja	Päästöhaittoja	Puhdistusmenetelmiä
Vesihöyry	Syöpyminen, tukkiutuminen		adsorptio (silikageeli ym.), absorptio (glykoli ym.), jäähdytys, paineistus
Rikkiyhdisteet	Syöpyminen	Happamoituminen, myrkyllisyys, haju	biologinen absorptio (vesi), kemiallinen adsorptio (rauta, aktiivihiili)
Halogenoidut hiilivedyt	Syöpyminen	Happamoituminen, myrkyllisyys	adsorptio, absorptio, jäähdytys
Ammoniakki		Myrkyllisyys, rehevöityminen	absorptio (vesi), adsorptio
Siloksaanit	Karstoittuminen		fysikaalinen adsorptio (aktiivihiili, silikageeli, ym.), kemiallinen adsorptio, jäähdytys, absorptio (vesi, orgaaniset yhdisteet)
Hiukkaset	Karstoittuminen		absorptio, suodatus, sykloni
Happi	Räjähdytys		kemiallinen adsorptio

Biokaasu on puhdistettava ennen käyttöä, sillä epäpuhtaudet aiheuttavat korroosiota moottoreissa ja kaasun metallisissa varastointisäiliöissä ja vähentävät siten niiden elinikää. Biokaasun käyttö polttoaineena ehkäisee fossiilisten raaka-aineiden esiintymien loppumista, haju- ja meluhaittoja sekä kasvihuoneilmiötä. Biokaasun hiilidioksidipäästöt ovat yli 95 % pienemmät kuin bensiini- ja dieselikäyttöisten ajoneuvojen moottoreissa. Lisäksi noki- ja hiukkaspäästöt sekä typen oksidien ja Non-metaanihiilivetyjen (NMHC) päästöt ovat huomattavasti pienemmät. Biokaasu on turvallinen polttoaine, sillä sen syttymispiste on 600 °C, se on ilmaa kevyempää ja se haihtuu nopeasti vuodon sattuessa. ^{21,22} Taulukossa 2 on esitetty biokaasun, bensiinin ja dieselin energiasisältö.

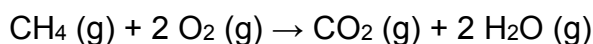
Taulukko 2. Biokaasun, bensiinin ja dieselin energiasisältö²¹

Polttoaine	Energiasisältö [kWh]
1 Nm ³ biokaasua (65 % metaania)	6,5
1 Nm ³ biokaasua (97 % metaania)	9,7
1 litra bensiiniä	9,1
1 litra dieselä	9,8

Biokaasun puhdistuksen ja jalostuksen lisäksi kaasu on paineistettava (200-250 bar) ennen liikennekäyttöä. Metaaniajoneuvot voivat olla mono-fuel- tai bi-fuel-autoja. Mono-fuel-autoissa on tankki pelkästään kaasulle toisin kuin bi-fuel-autoissa, joissa on tankki myös bensiinille. Biometaania voi tankkata joko hidastankkaus- tai nopeatankkausjärjestelmällä. Hidastankkaus kestää useita tunteja, sillä kaasu paineistetaan vasta tankkauksen aikana. Tällöin ei tarvita korkeapaineista välivarastoa. Nopeatankkausjärjestelmässä kaasu tulee suoraan korkeapaineisesta varastosta, jolloin tankkaus kestää minuutteja.^{16,18}

3.2.2.2 Sähkön- ja lämmöntuotanto

Biokaasua on käytetty lämmityksessä useiden tuhansien vuosien ajan. Lämmöntuotannossa biokaasu on vain vähän valvontaa ja huoltoa tarvitseva, investoinniltaan pieni ratkaisu. Biokaasua ei tarvitse jalostaa sähkön- ja lämmöntuotantoon, mikäli biokaasun metaanipitoisuus on yli 40 %. Lämmöntuotannossa kaasupoltin, jolle alhaisessa paineessa oleva kaasu johdetaan vedenerotuksen jälkeen, lämmittää vettä laitoksen kiertovesijärjestelmään. Metaanin palaessa tapahtuu seuraava reaktio.¹⁷

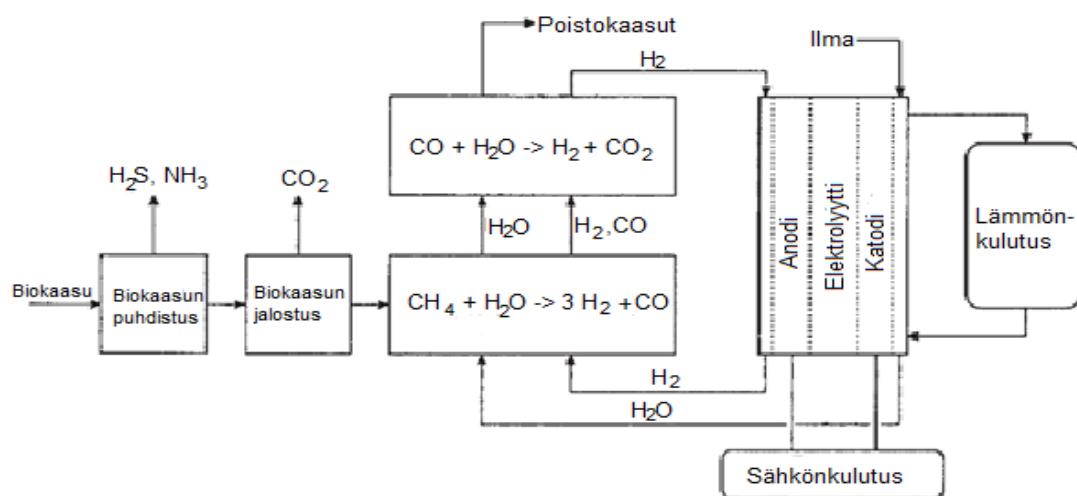


Lämmitys voidaan suorittaa joko laitekohtaisella tai keskitetyllä järjestelmällä. Laitekohtaisessa järjestelmässä biokaasu poltetaan loppukulutuslaitteessa, jolloin tuotannon hyötysuhde voi olla jopa 95 %. Keskitetyssä järjestelmässä kattilassa tuotettu lämpö siirretään väliaineen (vesi, höyry, ilma) avulla loppukulutukseen. Siirrossa tapahtuu lämpöhäviöitä, joten suurissa kaukolämpöverkoissa ja höyryn siirtoverkoissa hyötysuhde voi olla alle 70 %. Biokaasulla tuotettua lämpöä käytetään biokaasureaktorien lämmittämiseen, jolloin laitoksen käyttöön kuluu noin 10-40 % biokaasusta.^{17,18}

Sähkön- ja lämmön yhteistuotannossa eli CHP:ssä (Combined Heat and Power) biokaasu ohjataan vedenerotuksen jälkeen kaasumoottorille, joka ohjaa sähköä tuottavaa generaattoria. Kaasumoottorien lisäksi käytössä on myös mikroturbiineja, joita kytkemällä rinnakkain voi saavuttaa saman tehon kuin kaasumoottorilla. Yleensä kaasumoottoreita käytetään keskikokoisissa ja isoissa laitoksissa ja

mikroturbiineja kaatopaikkapumppaamoilla. Molempien sähköntuotannon hyötysuhde on 25-40 %. Sähkögeneraattorien jäähdytysjärjestelmistä ja pakokaasuista voidaan ottaa lämmönvaihtimien avulla lämpöä talteen. Teknisesti on mahdollista saada 35 % biokaasun sisältämästä energiasta talteen.^{17,18}

Biokaasua on mahdollista hyödyntää myös polttokennoissa, joissa sähköä tuotetaan sähkökemiallisesti hapetus- ja pelkistymisreaktioiden kautta. Polttokennojen toiminta on hyvin herkkä epäpuhtauksille, joten biokaasun puhdistus on suoritettava huolellisesti. Polttokennot ovat luotettavia, hiljaisia, tehokkaita ja niiden typpioksidipäästöt ovat erittäin alhaiset. Parhaiten biokaasun käytölle soveltuvat korkean lämpötilan (750-1000°C) vaativa kiinteä oksidi polttokenno (SOFC, solid oxide fuel cell) sekä sula karbonaatti polttokenno (MCFC, molten carbonate fuel cell) (600-700°C). Biokaasu on muutettava vedyksi, sillä pelkästään vetyä voidaan käyttää sähköntuotantoon polttokennoissa. Polttokennojen toiminta (kuva 3) perustuu kahden elektrodin (anodi ja katodi) välille syntyvään sähkövirtaan. Anodille syötetään ulkopuolisesta lähteestä biokaasua ja katodille hapetinta (ilma), jolloin elektronit siirtyvät ulkoista piiriä pitkin anodilta katodille, jossa hapetin pelkistyy eli vastaanottaa elektronin. Elektrodien välissä on kiinteä tai nestemäinen elektrolyytti, joka estää biokaasun ja hapettimen suoran sekoittumisen tai palamisen. Polttokennojen hyötysuhde (40-60 %) on suurempi kuin CHP:n, mutta niiden investointikustannukset ovat myös paljon suuremmat, sillä ne tarvitsevat tehokkaan kaasun puhdistuksen.^{18,21}



Kuva 3. Polttokennon toimintaperiaate²¹

3.2.3 Mädätysjäännöksen hyödyntäminen

Mädätysjäännös on juoksevaa, hygienisoidumpaa, tasalaatuisempaa ja jopa 80 % hajuttomampaa kuin syöttömateriaali.¹⁶ Se sisältää vettä, anaerobisen reaktion tuotteita sekä kaiken epäorgaanisen aineksen, kuten typen, fosforin, kaliumin ja magnesiumin, mikä biokaasureaktoriin on syötetty. Sitä voidaan käyttää lannoitteena, maanparannusaineena sekä polttoaineena. Mädätysjäännöksen hyödyntäminen polttoaineena ei ole kuitenkaan järkevää, sillä orgaanisen aineen hajoamisen takia lietteen lämpöarvo huononee merkittävästi. Mädätysjäännöksen arvo kasvinravinnekäytössä kasvaa biokaasuprosessissa, sillä anaerobisen hajoamisen yhteydessä taudinaiheuttajat kuolevat. Lisäksi tapahtuu ammonifikaatiota eli typen hajoamista ammoniumtypeksi ($\text{NH}_4\text{-N}$), jota kasvit voivat käyttää paremmin hyödykseen. Kasvit ottavat typpeä sekä ammoniumtyppinä että nitraattina. Ammoniumtyppi muuttuu nitraatiksi liuetessaan veteen, joten kasvit saavat nitraattia jatkuvasti vedenoton yhteydessä. Liukoisuuden johdosta nitraatti liikkuu helposti maaperässä. Ammoniumtyppi taas sitoutuu maapartikkeleihin. Useasti mädätysjäännös kuivataan tai kompostoidaan ennen käyttöä.^{15,18}

3.3 Hyödyntäminen kierrätyslannoitteena

Puhdistamolietteen ominaisuudet riippuvat jätevedenkäsittelyprosesseista sekä lietteen käsittelymenetelmistä.²³ Se sisältää arvokkaita ravinteita, kuten typpeä ja fosforia, joten sillä voidaan korvata kaupallisia, epäorgaanisia lannoitteita. Puhdistamolietettä ei saa kuitenkaan käyttää sellaisenaan lannoitteena, vaan se täytyy ensin käsitellä esimerkiksi kompostoimalla, mädättämällä tai kalkkistabiloimalla. Arvokkaiden ravinteiden lisäksi liete sisältää myrkyllisiä metalleja, patogeenejä sekä orgaanisia epäpuhtauksia, jotka voivat liian suurina pitoisuuksina estää lietteen hyödyntämisen lannoitteena. Lisäksi puhdistamolietepohjaiset lannoitteet voivat aiheuttaa hajuhaittoja. Puhdistamolietepohjaisia lannoitevalmisteita ei saa käyttää viljelymailla, joissa kasvatetaan kasveja, joita käytetään tuoreena ravinnoiksi tai eläinten rehuksi. Niitä voi hyödyntää ainoastaan pelto- ja puutarhakäytössä, viherrakentamisessa sekä maisemoinnissa.²⁴

3.3.1 Lannoitteiden tyyppiryhmät

Puhdistamolietteen lannoitevalmisteet voidaan jakaa kolmeen tyyppiryhmään: orgaanisiin maanparannusaineisiin, nestemäisinä orgaasina lannoitteina sellaisenaan käytettäviin sivutuotteisiin ja maanparannusaineena sellaisenaan käytettäviin sivutuotteisiin. Näiden tyyppiryhmien valmistusmenetelmät ja koostumus sekä toimijoiden ja tuotteiden käytölle säädetyt vaatimukset eroavat toisistaan.^{2,3}

Orgaanisilta maanparannusaineilta vaaditaan aina laitoshyväksyntä, mutta niitä ei koske kaikki lannoitevalmisteasetuksessa asetetut käytön rajoitteet. Orgaanisia maanparannusaineita ovat tuorekomposti, maanparannuskomposti sekä termisestä kuivauksesta saatava kuivarae.²

Rejektivettä, jossa raaka-aineena on käytetty korkeintaan 10 % puhdistamolietettä, voidaan käyttää nestemäisinä orgaanisina lannoitteina sellaisinaan käytettävänä sivutuotteena. Rejektivettä syntyy lieteveden kuivaus- ja tiivistysvaiheissa.^{2,3}

Sellaisenaan maanparannusaineiksi soveltuvilla sivutuotteilla ei ole stabiilisuuden kriteeriä, joten ne eivät edellytä laitoshyväksyntää, mikäli liete käsitellään syntypaikalla, jätevedenpuhdistamolla. Biokaasulaitosten mädätysjäännös, kalkkistabiloitu puhdistamoliete sekä kemiallisesti hapetettu puhdistamoliete ovat sellaisenaan maanparannusaineiksi soveltuvia sivutuotteita. Nämä voidaan edelleen kompostoida, kuivata termisesti tai rakeistaa, jolloin ne ovat tarpeeksi hygienisoituja ja niitä voidaan markkinoida orgaanisina maanparannusaineina.^{2,25}

3.3.2 Puhdistamolietteen ravinteet

Puhdistamolietteestä valmistetut lannoitevalmisteet mahdollistavat ravinteiden kierrättämisen ja vähentävät kaupallisten epäorgaanisten lannoitteiden tarvetta.²⁴ Niiden ravinnepitoisuus riippuu käytetystä raaka-aineesta ja niiden suhteista, käsittelytavoista ja -ajasta sekä varastointiajasta ja sen kestosta sekä niihin mahdollisesti lisätyistä orgaanisista materiaaleista, kuten kompostoinnin tukiaineista, yhdyskuntien biojätteestä, elintarviketeollisuuden biojätteestä sekä

teollisuuden biohajoavista sivutuotteista. Maailman fosforivarojen pienentyessä puhdistamoliete on hyvin tärkeä fosforin lähde. Lisäksi puhdistamolieteen tärkeitä hivenravinteita ovat typpi ja kalium. Näiden kolmen pääravinteen sekä raskasmetallien, kuiva-aineen ja orgaanisen aineen pitoisuudet sekä lannoitteen pH ja tiheys ilmoitetaan puhdistamolietepohjaisten lannoitevalmisteiden tuoteselostuksissa. Muiden ravinteiden, kuten rikin ja magnesiumin pitoisuuksia ei tuoteselostuksessa tarvitse ilmoittaa.^{2,26}

Fosfori on tärkeä aine solujen toiminnassa. Jäteveden fosforisisällöstä noin 90 % voidaan sitoa puhdistamolietteen. Puhdistamolietepohjaisissa lannoitteissa fosfori on enimmäkseen sitoutuneena orgaaniseen ainekseen. Alle yksi prosentti fosforista on liukoisessa muodossa. Sen osuus riippuu saostuskemikaalista ja sen määrästä. Uuttamalla (0,1 M natriumkarbonaatti) liukoisen fosforin määrää voidaan nostaa 5-10 %. Liian suuri fosforipitoisuus voi aiheuttaa rehevöitymistä.^{2,27}

Typpi on sekä sitoutuneena orgaaniseen aineeseen että liukoisessa muodossa. Ammoniumtyppi, nitraatti ja pieniin orgaanisiin typpiyhdisteisiin sitoutunut typpi ovat liukoista typpeä. Niiden määrään vaikuttaa orgaanisen aineen käsittelytapa sekä hajoamisaste. Liukoisen typen lannoitusvaikutus on vuosittainen, hyvissä olosuhteissa vastaava kuin epäorgaanisen lannoitteen. Orgaaniseen ainekseen sitoutunut typpi on taas hyvin hitaasti vapautuvaa, joten sillä ei ole havaittu lannoitusvaikutusta edes levityksen jälkeisenä vuonna. Typen vapautumista hidastavat mm. mädätyksessä tapahtuva helposti hajoavien typpiyhdisteiden vapautuminen ammoniumina, kompostoinnin aikana liukoisen typen sitoutuminen orgaaniseen ainekseen sekä termisessä kuivauksessa tapahtuva ammoniakkin haihdutus. Tämän vuoksi lannoituksessa on järkevää antaa osa tyypestä epäorgaanisina lannoitteina, sillä on kasvien nopean typen oton kannalta riskialtista ottaa kaikkea typpeä puhdistamolietepohjaisista lannoitteista.²

Puhdistamolietepohjaisissa lannoitteissa kalium on käytännössä kokonaan liukoisessa muodossa. Jätevesi on heikko kaliumin lähde (2-6 g/kg), joten viljelykasvit vaativat kaliumtäydennystä epäorgaanisista lannoitteista.²

Puhdistamolietepohjaiset lannoitteet sisältävät runsaasti (n. 50 %) orgaanista hiiltä, joten ne lisäävät maan ravinnepitoisuuden lisäksi maan orgaanisen aineen määrää. Tämä parantaa maaperän fysikaalis-kemiallisia sekä biologisia

ominaisuuksia, kuten maaperän mikrobien ja entsyymien toimintaa, maaperän mururakennetta, huokoisuutta, stabiilisuutta ja vedenpidätyskykyä sekä vähentävät eroosiota ja kasvitauteja.^{2,23}

3.3.3 Puhdistamolietteen haitta-aineet

3.3.3.1 Haitalliset metallit

Puhdistamolietteiden raskasmetallipitoisuudet ovat laskeneet viime vuosina merkittävästi. Puhdistamolietteen raskasmetallipitoisuuksiin vaikuttavat lietteen alkuperä, jäteveden käsittelymenetelmät ja puhdistamolietteen käsittelyprosessi. Etenkin teollisuudesta kulkeutuu raskasmetalleja (Cd, Zn, Cu, Cr, Ni, Pb) jäteveteen. Jotkut metallit, kuten kupari ja sinkki ovat kasvin kasvulle tärkeitä hivenaineita, mutta useimmat metalleista ovat kuitenkin myrkyllisiä.² Metallit ovat hyvin pysyviä maaperässä, joten niiden kertyessä maaperään, ne voivat kulkeutua ravintoketjussa ihmisille, joka voi aiheuttaa vakavan terveysvaaran. Kadmiumia pidetään vaarallisimpana puhdistamolietteen raskasmetallina perustuen kasvien kykyyn kerätä kadmiumia. Vaarallisinta kadmium on lehtivihanneksille, sillä kadmiumia kertyy etenkin kasvien lehtiin. Puhdistamolietteen metallipitoisuuksille on määritetty ylärajat (taulukko 3).^{23,24}

Taulukko 3. Viljelysmaan haitallisten metallien enimmäispitoisuudet ja lietteen aiheuttama suurin sallittu vuotuinen kuormitus²⁴

Alkuaine	Viljelymaan enimmäispitoisuus mg/g kuiva-aineessa	Kuormituksen enimmäispitoisuus g/ha vuodessa
Elohopea (Hg)	0,2	1,0
Kadmium (Cd)	0,5	1,5
Kromi (Cr)	200	300
Kupari (Cu)	100	600*
Lyijy (Pb)	60	100
Nikkeli (Ni)	60	100
Sinkki (Zn)	150	1500*

* Jos maaperässä on todettu puutetta, voi määrä olla enimmillään kaksinkertainen

3.3.3.2 Taudinaiheuttajat

Puhdistamoliete voi sisältää myös patogeenejä eli taudinaiheuttajia. Puhdistamolietteen laaduntarkkailussa seurataan lietteen *Escherichia coli*-bakteerien ja salmonellan määrää. Salmonellaa lietteessä ei saa esiintyä ollenkaan ja *Escherichia coli*-bakteeria enintään 1000 pesäkettä muodostuvaa yksikköä (pmy)/g. Puhdistamolietepohjaiset lannoitevalmisteet eivät saa sisältää karanteenituhoojia eli haitallisten kasvitautien aiheuttajia eikä haitallisten rikkakasvien siemeniä. Lannoitevalmisteet eivät saa myöskään sisältää yli 0,5 % tuorepainosta roskia, kuten lasia, metallia, muovia tai kiviä.²

3.3.3.3 Orgaaniset haitta-aineet

Puhdistamolietteeeseen voi kulkeutua orgaanisia haitta-aineita mm. pesuaineista, muovin pehmittimistä, palonestoaineista, elektroniikkateollisuudessa käytetyistä PCB-yhdisteistä (polyklooratut bifenyylit), lääkkeistä ja kosmetiikasta. Useimmiten niiden lähteenä ovat kotitaloudet ja pienyritykset sekä ilmalaskeuma. Puhdistamolietteeeseen päätyvät orgaaniset haitta-aineet voidaan luokitella yhdeksään eri luokkaan:²⁷

- 1) Fossiilisten polttoaineiden epätäydellisen palamisen seurauksena syntyvät pysyvät yhdisteet (polyaromaattiset hiilivedyt (PAH), polyklooratut dibentsiodioksiinit ja furaanit (PCDD/F)), jotka laskeutuvat kivipinnoille ja huuhtoutuvat valumavesien mukana jätevesien keräysjärjestelmiin.
- 2) Puunsuojauksessa käytettyjen pysyvien yhdisteiden, kuten kreosiitin ja pentakloorifenolin (PCP), epäpuhtaudet voivat huuhtoutua valumavesien avulla jätevesien keräysjärjestelmiin.
- 3) Kontrolloitujen pysyvien yhdisteiden (PAH, PCB, PCDD) haihtuminen maaperästä, jolloin ne voivat laskeutua ja huuhtoutua valumavesien mukana jätevesien keräysjärjestelmiin.
- 4) Ruoanvalmistuksessa syntyvät pysyvät yhdisteet (PAH) voivat päätyä jätevesien keräysjärjestelmiin.

- 5) Pysyvien yhdisteiden (klooratut torjunta-aineet), kulkeutuminen kotitalousvesien mukana jätevesien keräysjärjestelmiin. Näiden yhdisteiden käyttö on kuitenkin nykyään kielletty niiden pysyvyyden vuoksi.
- 6) Kotitalouksista tai teollisista prosesseista peräisin olevat liuottimet, palonestoaineet sekä tuotteiden käytön yhteydessä muoveista pinnoilta vapautuvat yhdisteet voivat päätyä jätevesien keräysjärjestelmiin (bis(2-etyyli-heksyyli)ftalaatti (DEPH), bromatut palonestoaineet).
- 7) Pesuainejäämät (lineaarinen alkyylibentseenisulfonaatti (LAS), nonyylifenolietoksylaatit (NPE), nonyylifenolit (NP)).
- 8) Lääkeaineet, antibiootit, endogeeniset hormonit ja synteettiset steroidit.
- 9) Edellisistä ryhmien yhdisteet, jotka voivat häiritä hormonitoimintaa.

Orgaanisten haitta-aineiden vaikutuksesta ympäristöön on tehty paljon tutkimusta, mutta kaikkia ympäristöriskejä ei vielä tunneta. Orgaaniset haitta-aineet voidaan luokitella kolmeen luokkaan niiden käyttäytymisen mukaan:²⁷

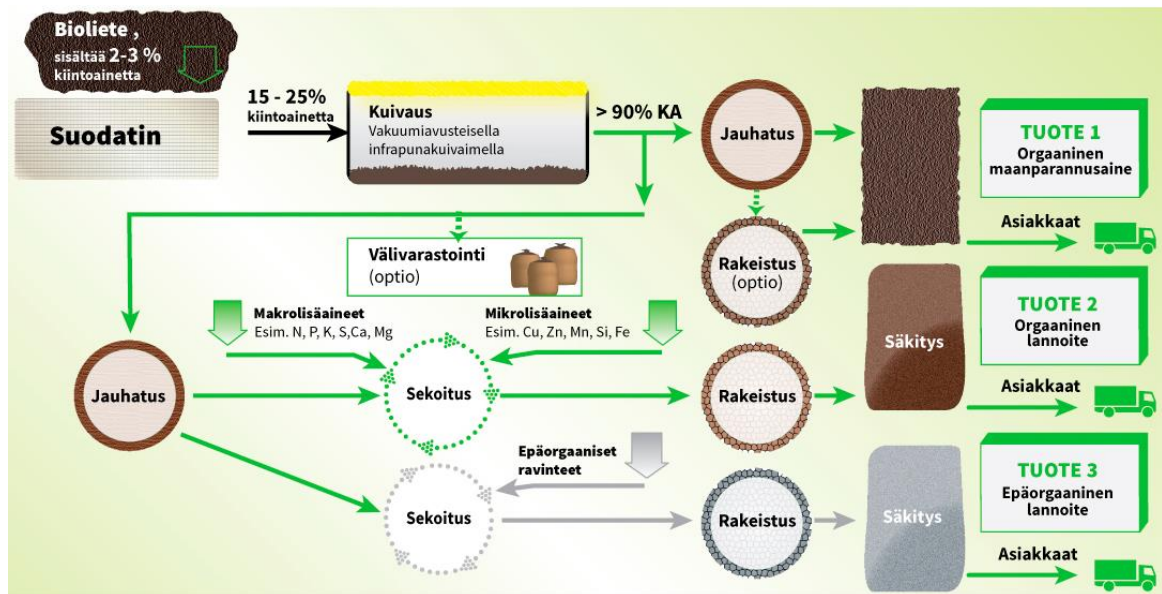
- 1) Haihtuvat yhdisteet, jotka häviävät nopeasti ilmakehään.
- 2) Yhdisteet, joilla on nopea biohajoavuus ja vähäinen tai olematon pysyvyys.
- 3) Pysyvät yhdisteet, jotka absorboituvat voimakkaasti lietteeseen ja maaperän orgaaniseen aineeseen.

Osa haitta-aineista voi hajota useaksi eri yhdisteeksi ja osalla voi olla yhteisvaikutusta, joiden vaikutuksia ei vielä täysin tunneta. Näin ollen orgaanisille haitta-aineille ei ole ainakaan toistaiseksi asetettu raja-arvoja. Jokainen kansalainen pystyy omilla valinnoillaan ja teoillaan vaikuttamaan siihen, mitä aineita päätyy jätevesiverkoston kautta puhdistamolietteeseen. Kuten metallit, niin myös orgaaniset haitta-aineet voivat aiheuttaa terveysvaaran ihmisille. Esimerkiksi pysyvät vesiliukoiset yhdisteet (esim. PFAS, PBDE) voivat painua suotovesien mukana syvempiin maakerroksiin, ja sitä kautta päätyä pohjavesiin ja edelleen juomaveteen. Lisäksi PFAS-yhdisteet sekä rasvaliukoiset aineet, kuten PCB ja bromatut palonestoaineet, kertyvät eläinperäisiin elintarvikkeisiin (liha, maito, munat). Taulukossa 4 on esitetty esimerkkejä orgaanisista haitta-aineista puhdistamolietteessä sekä niiden ominaisuuksia ja päästölähteitä.²

Taulukko 4. Esimerkkejä orgaanisista haitta-aineista puhdistamolietteessä, niiden ominaisuuksista ja päästölähteistä²

Yhdiste/yhdisteryhmä	Biohajoavuus ja haitallisuus	Esimerkkejä päästölähteistä
Polyaromaattiset hiilivedyt (PAH)	karsinogeenisiä, mutageenisia, hajoavat jonkin verran, suurimolekyylliset yhdisteet varsin pysyviä	öljytuotteet, epätäydellinen palaminen
Bromatut palonestoaineet (PBDE, PBB, TBBA)	karsinogeenisiä, mutageenisia, hajoavat osittain, maaperässä erittäin hitaasti hajoavia, kertyvät eliöihin ja elintarvikkeisiin	elektroniikkateollisuus, muovit, sisustustekstiilit
Polyklooratut dibentso-p-dioksiinit ja furaanit (PCDD/F) eli dioksiinit	karsinogeenisiä, biokertyviä, aiheuttavat kehityshäiriöitä, hitaasti hajoavia, kertyvät eliöihin	polttoprosessit, sementin valmistus, metalliteollisuus
Polyklooratut bifenyylit (PCB)	karsinogeenisiä, aiheuttavat kehityshäiriöitä, pysyviä, kertyvät eliöihin	hydraulinesteet, liuottimet, elektroniikkateollisuus. NYKYÄÄN YHDISTEIDEN KÄYTTÖ KIELLETTY
Perfluoratut alkyyliyhdisteet (PFAS)	maksa- ja kehityshäiriöitä, hormoneiden toimintaa häiritseviä ominaisuuksia, kertyvät eliöihin ja eläinperäisiin elintarvikkeisiin, maaperässä erittäin hitaasti hajoavia	teollisuus ja kotitaloudet, huonekalutekstiilit, vaatteet ja paperituotteet (vettä hylkivät aineet), sammutusvaahdot
Lineaariset alkyynibentseenisulfonaatit (LAS)	estrogeenin kaltaisia ominaisuuksia, hajoavat melko hyvin hapellisissa olosuhteissa	teollisuus ja kotitaloudet, puhdistus- ja pesuaineiden pintajännitystä alentavat aineet
Nonyylifenolietoksilaatit (NPEO) ja nonyylifenolit (NP)	voivat häiritä eläinten ja ihmisten hormonitoimintaa ja aiheuttaa kehityshäiriöitä, NPEO nopeasti hajoava, mutta hajoamistuote NP on melko pysyvä	käytetään pinta-aktiivisina aineina mm. teollisuusprosesseissa, pesuaineissa ja useissa teollisuuden ja kotitalouden tuotteissa
Bis(2-etyyli-heksyyli)ftalaatti (DEPH)	kehitystä ja lisääntymistä häiritseviä ja estrogeenihormonin kaltaisia ominaisuuksia, hajoaa jossain määrin hapellisissa oloissa, maaperässä kohtalaisen hitaasti hajoava	teollisuus ja kotitaloudet, käytetään muovien pehmittiminä
Adsorboituva orgaaninen halogeeni (AOX)	hajoamisnopeus vaihtelee, hajoamista tapahtuu erityisesti hapettomissa oloissa	sairaaloiden ja laboratorioden jätevedet, selluloosan koorivalkaisu, syntyy maaperässä klooria sisältävien pesu- ja desinfiointiaineiden käytön myötä

saatua lietettä voidaan käyttää maanparannusaineena tai tuotteistaa kierrätyslannoitteeksi lisäämällä mikro- ja makroravinteita. Prosessin etuna on pieni tilan tarve, joten sitä voidaan käyttää jätevedenpuhdistamon yhteydessä.³⁰



Kuva 5. Lannoitevalmisteiden valmistaminen Paskier prosessilla³⁰

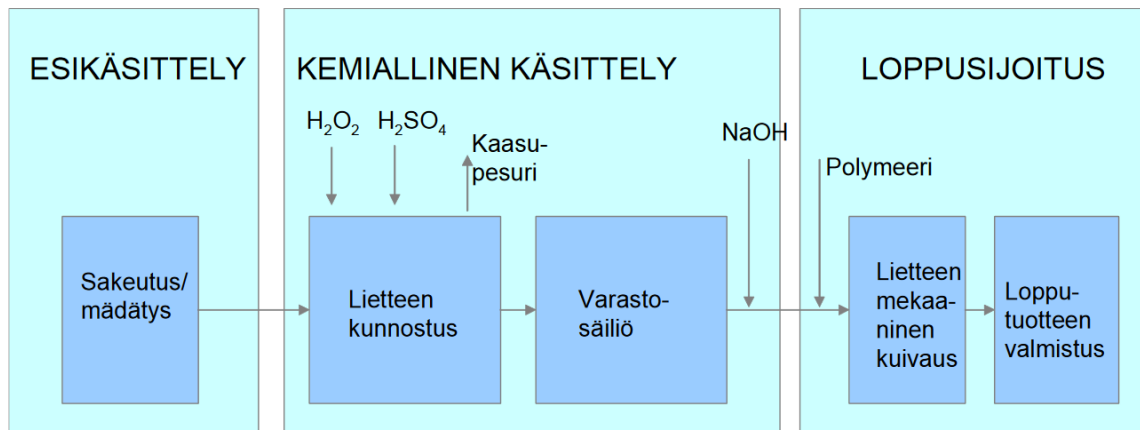
3.4 Muut hyödyntämismahdollisuudet

Kompostoinnin ja mädätyksen lisäksi puhdistamolietettä voidaan käsitellä polttamalla, märkähapetuksella, pyrolyysillä, kaasutuksella sekä kemiallisesti kalkkistabiloimalla ja kemicond-käsittelyllä. Suomessa puhdistamolietteen poltto on kuitenkin harvinaista pitkien lupamenettelyjen, matalan lämpöarvon ja korkean vesipitoisuuden takia. Vuonna 2015 kaksi polttolaitosta poltti pieniä määriä puhdistamolietettä Suomessa. Poltossa orgaaniset haitta-aineet ja raskasmetallit voivat kertyä tuhkaan riippuen lietteen laadusta. Lisäksi poltossa syntyy saastuneita pakokaasuja, joten poltto vaatii tehokkaita kaasun käsittelyjärjestelmiä, mikä nostaa käyttökustannuksia.^{25,30,31}

Puhdistamolietteen kaasutus on 800-900 °C lämpötilassa suoritettava tehokas prosessi, jossa liete muutetaan synteetikaasuiksi, joita voidaan hyödyntää energiana. Samalla lietteen tilavuus pienenee huomattavasti. Kaasutuksen rikkidioksidin, typen oksidien, raskasmetallien, tuhkan ja orgaanisten haitta-aineiden

päästöt ovat paljon pienemmät kuin puhdistamolietteen poltossa. Sen haittatekijänä on kuitenkin synteesikaasun sisältämä hyvin myrkyllinen vetysyanidi sekä kaasutuksen käytön vähyys. Myöskään märkähapetuksesta ja pyrolyysistä ei ole pitkäaikaista käytännön kokemusta. Märkähapetuksessa liete hapetetaan veden kriittisen pisteen yläpuolella ($T > 374,2\text{ °C}$, $p > 22,1\text{ MPa}$), jolloin orgaaniset yhdisteet hajoavat, lietteen tilavuus pienenee ja lietteestä saadaan poistettua vaarallisia kaasumaisia yhdisteitä ja raskasmetalleja. Pyrolyysissä liete kuumennetaan hapettomissa olosuhteissa paineen alaisena $350\text{--}500\text{ °C}$ lämpötilaan, jolloin liete muuttuu erilaisiksi kaasuiksi, hiileksi, tuhkaksi, vesihöyryksi sekä pyrolyysiöljyksi. Kaasut voidaan hyödyntää polttoaineena tai biopolttoaineena nesteyttämällä ne ensin bioöljyksi.^{31,32,33}

Kemicond on Kemiran kehittämä puhdistamolietteen käsittelymenetelmä, jolla voidaan tuottaa hygienisoitua ja lähes hajutonta lietettä sekä raakalietteestä että sakeutetusta ja mädätetystä lietteestä. Se koostuu mahdollisesta lietteen esikäsittelystä (sakeutus, mädätys), kemiallisesta käsittelystä, lietteen kuivauksesta sekä lietteen jatkokäsittelystä ja loppusijoituksesta (kuva 6). Kemiallisessa käsittelyssä lietteeseen lisätään rikkihappoa, joten pH laskee neljään, lietteen geelimäinen rakenne hajoaa ja metallisuolat (mm. rautafosfaatit ja -hydroksidit) liukenevat. Tämän jälkeen puhdistamoliete hapetetaan vetyperoksidilla, jolloin fosfaatti-ionit saostuvat, rakenne hajoaa edelleen ja lietteestä vapautuu vettä. Kemiallisen käsittelyn lopuksi liete neutralisoidaan natriumhydroksidilla. Lietteeseen lisätään kuivauksen tehostamiseksi polymeeriä ennen lietteen kuivaamista. Kuivauksen jälkeen liete on rakeista ja lähes tarttumatonta, joten sitä on helppo käsitellä ja kuljettaa. Sitä voidaan hyödyntää suoraan maanparannusaineena tai kompostoinnin jälkeen orgaanisena maanparannusaineena. Kemicond käsittelyn ongelmana on käyttökustannukset, sillä se vaatii useita kemikaaleja. Ongelmana on myös kemikaaleista aiheutuvat turvallisuus- ja ympäristöriskit.²⁵



Kuva 6. Kemicond käsittelyn vaiheet²⁵

Kalkkistabiloinnissa puhdistamolietteen pH nostetaan yli 11, jolloin biologinen toiminta loppuu ja liete hygienisoituu. Kalkkistabilointi voidaan suorittaa poltetulla kalkilla (CaO) tai sammutetulla kalkilla ($Ca(OH)_2$). Poltetulla kalkilla stabiloidessa lietteen lämpötila nousee 50-70 °C ja lietteen pH tasolle 12, jonka tulee säilyä vähintään kaksi tuntia. Sammutetulla kalkilla stabiloidessa ei lietteen lämpötila nouse, joten hygienisoinnin varmistamiseksi pH:n on pysyttävä tavoitearvossa vähintään kahden vuorokauden ajan. Kalkkistabiloinnissa saatua hygieenistä lietettä, jonka pH-arvo ja kalsiumpitoisuus ovat korkeat, voidaan käyttää maanparannusaineena sellaisenaan käytettävänä sivutuotteena. Kalkkistabiloinnin ongelmana on lietteen määrän kasvu, korkeat kemikaalikustannukset sekä mahdollisuus hyödyntää kalkkistabiloitua lietettä ainoastaan kesäaikaan.^{2,3,25}

Vety on lupaava ja puhdas polttoaine, jolla on korkea lämpöarvo ja joka ei tuota palamisreaktiossa epäpuhtauksia. Vedyn valmistamista puhdistamolietteestä on tutkittu anaerobisella prosessilla. Jotta vetyä saataisiin tuotettua anaerobisella prosessilla, on metanogeneesiä kontrolloitava inhiboimalla metaania tuottavien bakteerien aktiivisuutta. Lisäksi puhdistamoliete olisi hyvä esikäsitellä, jotta vetyä kuluttavat bakteerit tuhoutuisivat, lietteen raskasmetallit absorboituisivat sekä jäykkien soluseinien sisälle sidotut yhdisteet vapautuisivat. Puhdistamoliete voidaan esikäsitellä mm. ultraäänen ja mikroaaltojen avulla sekä lämpö- ja happokäsittelyllä. Vedyn tuotantoon vaikuttavat lietteen C/N- suhde, pH, lämpötila ja sen sisältämät raskasmetallit. Puhdistamolietteestä on tuotettu vetyä vasta kokeellisessa mittakaavassa, sillä ongelmana on vedyn alhainen saantoprosentti (20-30 %) sekä

korkeat kustannukset. Jotta vedyn tuottaminen puhdistamolietteestä olisi taloudellisesti kannattavaa, pitäisi saantoprosentin olla 60-80 %. Näin ollen on tutkittava vielä lisää vedyn tuotannon mekanisme, siihen vaikuttavia tekijöitä ja taloudellista arviointia.³⁴

4 YHTEENVETO

Puhdistamoliete on jätevedenkäsittelyn sivutuote, joka sisältää hyödyllisten ravinteiden lisäksi monia haitallisia aineita, kuten myrkyllisiä raskasmetalleja, patogeeneja sekä orgaanisia haitta-aineita. Tämän vuoksi puhdistamolietteen käyttöä lannoitteena ja maanparannusaineena on säädetty lainsäädännöllä. Mikäli raskasmetallipitoisuudet eivät ole liian korkeita, voi puhdistamolietepohjaisilla lannoitteilla korvata kaupallisia, epäorgaanisia lannoitteita. Fosforivarojen vähentyessä, puhdistamolietepohjaiset lannoitteet ovat hyvin tärkeitä fosforinlähteitä. Orgaanisille haitta-aineille ei ole laadittu vielä raja-arvoja, kuten raskasmetalleille, sillä niiden kaikkia ympäristöriskejä ei vielä tunneta.

Aumakompostointi on yleisin ja edullisin puhdistamolietteen käsittelymenetelmä, jolla puhdistamoliete saadaan hygienisoitua niin, että liete soveltuu lannoitekäyttöön. Sen haittapuolena on kuitenkin epämiellyttävät hajukaasut, jätevedet sekä aumojen käsittelystä aiheutuvat meluhaitat. Lisäksi paljon käytetty puhdistamolietteen käsittelymenetelmä on mädätys, jolla saadaan tuotettua biokaasua sekä lannoitteeksi ja maanparannusaineeksi soveltuvaa mädätysjäätännöstä. Tulevaisuudessa puhdistamolietettä tullaan mädättämään yhä enemmän, sillä fossiilisten polttoaineiden korvaamisen seurauksena uusiutuvien polttoaineiden tarve on entistä suurempi. Etenkin biokaasun käyttöä liikenteen polttoaineena tullaan hyödyntämään entistä enemmän.^{25,26}

Teollistumisen ja kehittyneen puhdistamolietteen käsittelymenetelmän johdosta puhdistamolietteen määrä tulee kasvamaan tulevaisuudessa. Näin ollen on kehitettävä uusia lietteen käsittelymenetelmiä. Suomessa on hyödynnetty lietteen käsittelyssä jo kalkkistabilointia sekä kemicond-menetelmää. Puhdistamolietteen pyrolyysistä, märkähapetuksesta ja kaasutuksesta ei ole vielä laaja-alaista käytännönkokemusta. Puhdistamoliettestä on myös yritetty valmistaa kokeellisessa mittakaavassa vetyä, mutta sen ongelmana on vielä hyvin alhainen saantoprosentti sekä suuret kustannukset.

5 VIITTEET

1. CircHubs, *Puhdistamoliete*, <https://cirschubs.fi/tietopankki/puhdistamoliete/>, (haettu 5.12.2018).
2. Vesilaitosyhdistys. Puhdistamolietteen käyttö maataloudessa. **2013**.
3. Karttunen E. *RIL 124-2 Vesihuolto II*. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, Vammalan Kirjapaino Oy, 2004, s. 200-206, 555-557, 570-571.
4. Cukjati N., Zupancic M., Ros M., Grilc V., Composting of anaerobic sludge, An economically feasible element of a sustainable sewage sludge management. *Environ. Manage.* **2012**, 106, 48-55.
5. Moisio M. *Kompostoinnin kehittäminen*. Hämeen ammattikorkeakoulu, **2017**, s. 9-12.
6. Zhou H-B., Chen T., Gao, D., Zheng, G-D., Chen, J., Pan, T-H., Liu, H-T., Simulation of water removal process and optimization of aeration strategy in sewage sludge composting. *Bioresour Technol.* **2014**, 171, 452-450.
7. Guo R., Li, G., Jiang, T., Schychardt, F., Chen, T., Zhao, Y., Shen, Y., Effect of aeration rate, C/N ratio and moisture content on the stability and maturity of compost. *Bioresour Technol.* **2012**, 112, 171-178.
8. Mattila V. *Kompostin seos ja kiihdytysaineiden testaus*. Tampereen ammattikorkeakoulu, **2014**, s. 6, 11, 13-16, 19-28.
9. Yanez R., Alonso J.L., Diaz M.J., Influence of bulking agent on sewage sludge composting process. *Bioresour. Technol.* **2009**, 100, 5827-5833.
10. Puyuelo B., Gea T., Sanchez A., A new control strategy for the composting process based on the oxygen uptake rate. *Chem Eng.* **2010**, 165, 161-169.
11. Pace M.G., The composting process. *Extension Environmental Engineer*. Utah State University, **1995**.
12. Wu C., Li, W., Wang, K., Li, Y., Usage of pumice as bulking agent in sewage sludge composting, *Bioresour. Technol.* **2015**, 190, 516-521.
13. Zhou H., Ma, C., Gao, D., Chen, T-B., Zheng, G-D., Chen, J., Pan, T-H., Application of a recyclable plastic bulking agent for sewage sludge composting. *Bioresour. Technol.* **2014**, 152, 329-336.
14. Nelimarkka T. *Järvi-pohjanmaan jätevedenpuhdistamot*. Vaasan ammattikorkeakoulu, **2016**, s. 24-25, 30-31, 34.
15. Khalid A., Arshad, M., Anjum, M., Mahmood, T., Dawson, L., The anaerobic digestion of solid organic waste. *Waste Manage.* **2011**, 31, 1737-1744.
16. Weiland P., Biogas production: Current state and perspectives. *Appl Microbiol Biotechnol.* **2010**, 85, 849-860.
17. Latvala M. *Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT) - Biokaasun tuotanto suomalaisessa toimintaympäristössä*. Suomen ympäristö, Edita Prima Oy, **2009**, s. 29-54.

18. Kymäläinen M. *BIOKAASUTEKNOLOGIA raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen*. 36th ed. Forssa Print Oy: Suomen biokaasuyhdistys ry, **2015**, s. 59-75, 82-89, 94-98, 124-131, 150-154, 157-161.
19. Mao, C., Feng, Y., Wang, X., Ren, G., Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renew Sust Energ Rev.* **2015**, 45, 540-555.
20. Wladyslaw P., Biogas as a vehicle fuel. *J. KONES Powertrain and Transport*, **2011**, 18, 403-410.
21. Weiland P., Production and energetic use of biogas from energy crops and wastes in germany. *Appl Biochem Biotechnol.* **2003**, 109, 264-274.
22. Liljeblad N., *Biokaasun jalostus ja käyttö*, Oulun Yliopisto, **2017**, s. 30.
23. Singh RP., Agrawal M., Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. *Waste Management.* **2008**, 28, 347-358.
24. Evira. *Jätevesilietteet.* <https://www.evira.fi/kasvit/lannoitevalmisteet/lannoitteet-ja-lannoitevalmisteet/kierratysravinteet/jatevesilietteet/>, (haettu 11.11.2018).
25. Pöyry Environment Oy, *Lietteenkäsittelyn nykytila Suomessa ja käsittelymenetelmien kilpailukykyseelvitys*, **2007**, s. 29-37.
26. Tontti T., Poutiainen H., Heinonen-Tanski H., Efficiently treated sewage sludge supplemented with nitrogen and potassium is a good fertilizer for cereals. *Land Degrad Dev.* **2017**, 28, 742-751.
27. S. R. Smith. Organic contaminants in sewage sludge (biosolids) and their significance for agricultural recycling. *Phil. Trans. R. Soc. A.* **2009**, 367, 4005-4041.
28. Endev, *PAKU-prosessi.* <https://www.endev.fi/>, (haettu 17.11.2018).
29. Nanopar, <http://www.nanopar.fi> (haettu 29.11.2018).
30. Vesilaitosyhdistys, *Yhdyskuntalietteen käsittelyn ja hyödyntämisen nykytilannekatsaus*, **2017**.
31. Rulkens, W., Sewage sludge as a Biomass Recource for the Production of Energy: Overview and Assessment of the Various Options, *Energy&fuels*, **2008**, 22, 9-15.
32. Hakala, S. *Yhdyskuntajätevesilietteiden käsittelyn tilanne EU-maissa*, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, **2015**, s. 24-25, 31-34.
33. Liu, M., Xu, G., Li, G., Gasification as a new thermal processes of sewage sludge utilization, *ICMT*, **2011**, 4454-4457.
34. Yao Z., Su W., Wu D., Wu, D., Tang, J., Wu, W., Liu, J., HAn, W., A state-of-the-art review of biohydrogen producing from sewage sludge. *Int J Energy Res.* **2018**, 42(14), 4301-4312